

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

PCT/EP04/6504



REC'D	15 JUL 2004
WIPO	PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 103 28 938.0

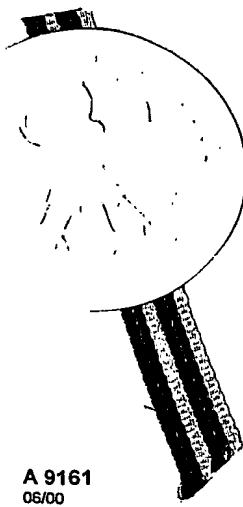
**Anmeldetag:** 27. Juni 2003

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Korrektur einrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung sowie Projektionsobjektiv für die Mikrolithografie

**IPC:** G 02 B 27/28

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**



München, den 17. Juni 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Dzierzon

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1 (a) OR (b)

PATENTANWÄLTE

DR. ULRICH OSTERTAG

DR. REINHARD OSTERTAG

EIBENWEG 10 D-70597 STUTTGART

TEL. +49-711-766845

FAX +49-711-7655701

---

Korrekturteinrichtung zur Kompensation von Störungen  
der Polarisationsverteilung sowie  
Projektionsobjektiv für die Mikrolithografie

---

Anmelder: Carl Zeiss SMT AG  
73446 Oberkochen

Anwaltsakte: 8479.7

Korrekturteinrichtung zur Kompensation von Störungen  
der Polarisationsverteilung sowie  
Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie

---

Die Erfindung betrifft eine Korrekturseinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels in einem optischen System, mit mindestens einem Korrekturglied, das ein doppelbrechendes Korrekturelement mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen umfaßt, zwischen denen die Dicke des Korrekturelements im wesentlichen konstant ist. Die Erfindung betrifft ferner ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie einer derartigen Korrekturseinrichtung.

5        10 Eine Korrekturseinrichtung sowie ein Projektionsobjektiv dieser Art sind aus der DE 198 07 120 A1 bekannt.

Bei zahlreichen optischen Systemen ist Voraussetzung für eine hohe Abbildungsqualität, daß sich das durch das optische System hindurchtretende Licht über den gesamten Bündelquerschnitt hinweg in einem definierten Polarisationszustand befindet. Da dieser definierte Polarisationszustand nicht konstant über den Bündelquerschnitt sein muß, spricht man häufig auch von einer definierten Polarisationsverteilung des Lichts. Kommt es zu Abweichungen von dieser definierten Polarisationsverteilung, so kann dies zu nicht tolerierbaren Abbildungsfehlern und/oder zu Kontrastverlusten 15 20 in der Bildebene führen. Als Ursachen für derartige Abwei-

chungen kommen beispielsweise die Polarisationsabhängigkeit reflektierender Schichten oder die Doppelbrechung bestimmter Linsenmaterialien in Betracht.

Der letztgenannte Punkt hat besondere Bedeutung im Zusammenhang mit mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen erlangt, wie sie etwa zur Herstellung hochintegrierter elektrischer Schaltkreise verwendet werden. Dort kommen in zunehmendem Maße Linsen aus Flußspat ( $\text{CaF}_2$ ) zum Einsatz, da diese Kristalle auch bei sehr kurzen Projektionswellenlängen noch eine ausreichende optische Transparenz aufweisen. Flußspat ist bei sehr kurzen Wellenlängen jedoch von Hause aus (d.h. intrinsisch) doppelbrechend; hinzutreten kann außerdem eine durch mechanische Spannungen hervorgerufene Doppelbrechung. Zwar sind inzwischen verschiedene Maßnahmen bekannt, um die Doppelbrechung von Flußspat-Linsen zu verringern, eine vollständige Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt des Projektionslichtbündels ist aber im allgemeinen nicht möglich. Bleiben diese Störungen unkompenziert, so verringert sich der Kontrast der Projektionsobjektive, was sich ungünstig auf die Größe der mit derartigen Anlagen gerade noch herstellbaren Strukturen führt.

Da die hier betrachteten Störungen der Polarisationsverteilung die Eigenschaft haben, über den Querschnitt eines Lichtbündels zu variieren, scheidet eine Kompensation mit herkömmlichen Polarisations-Kompensatoren, z.B. eines Soleil-Babinet-Kompensators, aus, da diese Kompensatoren

gleichmäßig über den Querschnitt des Lichtbündels hinweg wirken.

Aus der eingangs bereits genannten DE 198 07 120 A1 ist eine Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der

5 Polarisation bekannt, die über den Querschnitt eines Lichtbündels hinweg lokal variieren. Die dort beschriebene Korrektureinrichtung weist eine in den Strahlengang des optischen Systems eingebrachte Platte auf, die aus Magnesiumfluorid ( $MgF_2$ ) besteht und somit doppelbrechend ist. Die  
10 Dicke der Platte variiert dabei über deren Querschnitt, wodurch sich eine ortsabhängige Kompensationswirkung ergibt. Da die zur Kompensation erforderlichen Dickenschwankungen nur wenige Mikrometer betragen, lassen sich die Freiformflächen auf der Platte nicht durch Polieren oder andere  
15 klassische Verfahren des Materialabtrags herstellen. Vorgeschlagen wird deswegen eine Herstellung der Freiformflächen im Wege der Ionenstrahl-Bearbeitung. Derartige Bearbeitungsverfahren werden beispielsweise bei der Herstellung von sog. "Nanoasphären" eingesetzt, die zur Korrektur von  
20 Wellenfrontfehlern in Projektionsbelichtungsanlagen verwendet werden.

Um eine möglichst allgemeine Klasse von Polarisationsstörungen kompensieren zu können, wird die Verwendung zweier derartiger Platten vorgeschlagen, deren Hauptachsen um  $45^\circ$

25 zueinander verdreht sind. Da sich die Dickenschwankungen nicht nur auf die Polarisation, sondern in noch stärkerem Maße auf den Wellenfrontverlauf hindurchtretenden Lichts

auswirken, ist jeder der Korrekturplatten eine Quarzplatte zur Wellenfrontkompensation zugeordnet, die ihrerseits Dicken Schwankungen aufweisen, die jedoch komplementär zu denen der Korrekturplatten verlaufen. Eine Korrekturplatte und die dazugehörige Quarzplatte, die spaltfrei durch Anspren-  
5 gen oder Verketten miteinander verbunden werden, wirken sich in ihrer Gesamtheit aufgrund der annähernd gleichen Brechungsindizes kaum auf den Wellenfrontverlauf hindurch-  
tretenden Lichts aus.

10 Nachteilig bei dieser bekannten Korrektureinrichtung ist allerdings, daß die Korrekturplatten die Polarisation nicht nur dort beeinflussen, wo Störungen kompensiert werden sollen, sondern die Polarisation über den gesamten Querschnitt des Lichtbündels verändern. Dies hängt damit zusammen, daß  
15 die Korrekturplatten nicht ausschließlich dort doppelbrechendes Material aufweisen können, wo eine Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung erforderlich ist. Die Korrekturplatten dürften dann nämlich nur wenige Mikrometer dick sein und wiesen zudem Löcher an den Stellen auf, an  
20 denen keine Störungen zu kompensieren sind. Derartige Korrekturplatten wären weder herstell- noch handhabbar. Daher müssen die Korrekturplatten zusätzliches, als eine Art Träger wirkendes Material aufweisen, das jedoch über seinen gesamten Querschnitt hinweg zur Polarisationsbeeinflussung  
25 beiträgt.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Korrektureinrichtung der eingangs genannten Art derart zu verbessern, daß die Pola-

risation hindurchtretenden Lichts gezielt nur dort beeinflußt wird, wo Störungen der Polarisationsverteilung zu kompensieren sind.

Gelöst wird diese Aufgabe dadurch, daß wenigstens ein Korrekturglied wenigstens ein dem einen Korrekturelement zugeordnetes weiteres doppelbrechendes Korrekturelement mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen aufweist, daß wenigstens eine der Oberflächen wenigstens eines der Korrekturelemente so nachbearbeitet ist, daß sich lokale Dicken Schwankungen  $\Delta d$  ergeben, durch die die Störungen der Polarisationsverteilung zumindest annähernd kompensiert werden, und daß die Anordnung, Dicke und Doppelbrechungseigenschaften der Korrekturelemente so gewählt sind, daß sich deren doppelbrechenden Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn die lokalen Dickschwankungen außer Betracht bleiben.

Die Erfindung beruht auf der Erkenntnis, daß mehrere doppelbrechende Elemente, deren Doppelbrechungssachsen in geeigneter Weise zueinander orientiert sind, sich in ihrer doppelbrechenden Wirkung aufheben. Die Erfindung geht also zunächst von einer Anordnung zweier oder mehrerer doppelbrechender Korrekturelemente aus, die insgesamt die Polarisierung hindurchtretenden Lichts nicht beeinflussen. Wird nun an einem oder mehreren dieser Korrekturelemente die Dicke lokal verändert, so beschränkt sich die doppelbrechende Wirkung der gesamten Anordnung lediglich auf diejenigen Bereiche, in denen Dickenänderungen vorgenommen wurden. Falls die Korrekturelemente aus demselben doppelbre-

chenden Material bestehen, so müssen sie, abgesehen von den durch nachträgliche Bearbeitung eingebrachten Dickenschwankungen, die gleiche Dicke aufweisen, damit eine vollständige gegenseitige Kompensation der doppelbrechenden Wirkung  
5 eintritt.

Bei einem Korrekturglied, das aus zwei Korrekturelementen besteht, können diese beispielsweise mit um  $90^\circ$  zueinander verdrehten Doppelbrechungsachsen in der Korrekturteinrichtung angeordnet sein. Bei drei Korrekturelementen kommt ei-  
10 ne relative Orientierung der Doppelbrechungsachsen in  $120^\circ$ -Winkeln in Betracht.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung sind die Oberflächen der Korrekturelemente so komplementär zueinander nachbearbeitet, daß die Gesamtdicke aller Korrekturele-  
15 mente eines Korrekturglieds über deren Querschnitt hinweg konstant ist. Da das Korrekturglied als Ganzes keine Dik-  
kenschwankungen aufweist, werden Wellenfrontfehler weitge-  
hend vermieden. Dies gilt auch dann, wenn die einzelnen Korrekturelemente nicht unmittelbar aufeinander befestigt,  
20 sondern beabstandet voneinander in der Korrekturseinrichtung angeordnet sind. Falls es sich bei den Korrekturelementen beispielsweise um ebene Scheiben handelt, so wirkt das gesamte Korrekturglied wie eine planparallele Platte, die zwar lokal die Polarisierung, nicht aber nennenswert den  
25 Verlauf der Wellenfront beeinflußt. Auf zusätzliche Quarzplatten, die im Stand der Technik zum Ausgleichen der opti-

schen Weglängenunterschiede auf Grund der Dickenschwankungen erforderlich sind, kann somit verzichtet werden.

Vorteilhaft bei dieser Ausgestaltung ist ferner, daß sich die zur Störungskompensation an einem bestimmten Punkt erforderliche lokale Dickenschwankung auf diese Weise zwangsläufig auf mehrere Korrekturelemente verteilt. Falls beispielsweise das Korrekturglied zwei Korrekturelemente umfaßt, so führt die komplementäre Nachbearbeitung der Oberflächen dazu, daß eine lokale Dickenschwankung  $\Delta d$  so auf 10 die beiden Korrekturelemente verteilt wird, daß an dem entsprechenden Punkt die Dicke bei einem Korrekturelement um  $\Delta d/2$  verringert und bei dem anderen Korrekturelement um  $\Delta d/2$  vergrößert ist. Die Verteilung der Dickenschwankungen auf mehrere Korrekturelemente ist insbesondere bei größeren 15 Dickenschwankungen vorteilhaft, da sich diese mit den bekannten Methoden der Nachbearbeitung wie Ionen- oder Atomstrahlätzten nur mit größeren Schwierigkeiten präzise erzeugen lassen.

Idealerweise soll die Korrekturteinrichtung lediglich lokal 20 die Polarisation beeinflussen, ansonsten aber nicht die Lichtausbreitung in dem optischen System verändern, in dem die Korrekturseinrichtung eingebaut ist. Bei Strahlbündeln mit kleinem Aperturwinkel wird es vor diesem Hintergrund im allgemeinen ausreichen, die Korrekturelemente als planparallele 25 Platten auszuführen, deren Umfang an die Geometrie des durchtretenden Lichtbündels angepaßt sein kann. Bei Lichtbündeln mit größeren Aperturwinkeln hingegen kommen

auch Korrekturelemente mit gekrümmten, z.B. sphärischen, Oberflächen in Betracht.

Ein Anwendungsfall hierfür sind katadioptische Projektions-  
objektive, die in der Regel einen in einer Pupillenebene  
5 angeordneten sphärischen Abbildungsspiegel enthalten. Um  
die Korrekturteinrichtung möglichst nahe einer Pupillenflä-  
che und damit in unmittelbarer Nähe der gekrümmten Spiegel-  
oberfläche anzuordnen, ist eine Anpassung der Oberfläche  
der Korrekturelemente an die Spiegelkrümmung praktisch un-  
10 vermeidbar. Eine Anordnung der Korrekturseinrichtung in ei-  
ner Pupillenebene ist deswegen generell bevorzugt, weil  
diese dann eine feldunabhängige Wirkung hat, so daß als  
Korrekturgröße ein mittlerer Polarisationsfehler im Feld  
angenommen werden kann.

15 Selbst bei über den Querschnitt hinweg konstanter Gesamt-  
dicke aller Korrekturelemente sind allerdings geringfügige  
Wellenfrontfehler auf Grund der Dickenschwankungen der ein-  
zelnen Korrekturelemente nicht gänzlich vermeidbar. Aus  
diesem Grunde kann es zweckmäßig sein, daß wenigstens ein  
20 Korrekturelement eine Oberfläche aufweist, die zusätzlich  
derart nachbearbeitet ist, daß Wellenfrontfehler auf Grund  
der Dickenschwankungen verringert werden.

Mit lediglich einem Korrekturglied lassen sich nicht sämt-  
liche Arten von Polarisationsstörungen kompensieren. Deswe-  
25 gen sind bei einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung  
zwei Korrekturglieder vorgesehen, wobei die Doppelbre-

chungsachsen der Korrekturelemente des einen Korrekturglieds um  $45^\circ$  zu den Doppelbrechungssachsen der Korrekturelemente des anderen Korrekturglieds verdreht sind. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Phasenverschiebungen,  
5 sondern auch Drehungen der Polarisation kompensieren.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im folgenden anhand der Zeichnungen erläutert. Darin zeigen:

Figur 1 eine stark vereinfachte Darstellung der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels;  
10

Figur 2 eine perspektivische, nicht maßstäbliche Darstellung einer erfindungsgemäßen Korrekturteinrichtung mit zwei Korrekturelementen, die von einem Lichtbündel durchtreten werden;

15 Figur 3 einen Querschnitt durch die in Figur 2 gezeigten Korrekturelemente vor dem Zusammenfügen;

Figur 4 eine der Figur 3 entsprechende Darstellung, jedoch nach dem Zusammenfügen der Korrekturelemente;

20 Figur 5 einen Querschnitt durch ein anderes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Korrekturseinrichtung mit drei Korrekturelementen;

Figur 6 einen Querschnitt durch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Korrektureinrichtung, die zwei Korrekturglieder mit jeweils zwei Korrekturelementen umfaßt;

5 Figur 7 einen vereinfachten Meridionalschnitt durch ein katadioptisches Projektionsobjektiv mit einer erfindungsgemäßen Korrektureinrichtung.

Figur 1 zeigt einen Querschnitt durch ein Lichtbündel 10, in dem schematisch eine Polarisationsverteilung mit Hilfe von Pfeilen 12 angedeutet ist. Die Pfeile 12 sollen dabei die Polarisationsrichtung innerhalb des Lichtbündels 10 darstellen. Wie in Figur 1 erkennbar, ist das Licht über den Querschnitt des Lichtbündels 10 hinweg überwiegend linear mit der gleichen Polarisationsrichtung polarisiert. An 15 einigen Punkten, die in Figur 1 mit 14a, 14b und 14c bezeichnet sind, ist das Licht jedoch nicht exakt linear, sondern mehr oder weniger stark elliptisch polarisiert. Diese Störungen der Polarisationsverteilung können in nachfolgenden polarisationsselektiven optischen Elementen, z.B. 20 Strahlteilerschichten oder Verzögerungsplättchen, zu nicht tolerierbaren Abbildungsfehlern und/oder zur einem Kontrastverlust in der Bildebene führen.

Figur 2 zeigt in einer perspektivischen, nicht maßstäblichen Darstellung eine Korrektureinrichtung 16, mit der die 25 Störungen 14a, 14b und 14c in der Polarisationsverteilung des Lichtbündels 10 kompensiert werden können. Die Korrek-

tureinrichtung 16 weist neben in Figur 2 nicht dargestellten Halterungselementen ein Korrekturglied 18 auf, das seinerseits ein erstes und ein zweites scheibenförmiges Korrekturelement 20 bzw. 22 umfaßt, die fugenlos zusammengefügt sind. Die beiden Korrekturelemente 20, 22 sind aus Magnesiumfluorid-Kristallen ( $MgF_2$ ) gefertigt und daher doppelbrechend. Magnesiumfluorid ist insbesondere für Anwendungen in der Mikrolithographie geeignet, da es auch bei den dort verwendeten Wellenlängen von 193 nm oder 157 nm noch transparent ist.

Die Orientierung der Kristallachsen ist dabei so gewählt, daß sich für die beiden Korrekturelemente 20, 22 die in Figur 2 durch Achsenkreuze dargestellten Doppelbrechungssachsen ergeben. Die langsame Kristallachse mit dem größeren Brechungsindex  $n_1$  und die schnelle Kristallachse mit dem kleineren Brechungsindex  $n_2$  stehen jeweils senkrecht aufeinander und außerdem senkrecht zu der mit Z bezeichneten optischen Achse der Korrektureinrichtung 16.

Dies bedeutet, daß in dem ersten Korrekturelement 20 eine Polarisationskomponente des Lichtbündels 10, die entlang der langsamen Kristallachse verläuft, gegenüber der dazu senkrechten Polarisationskomponente eine auch als Verzögerung bezeichnete Phasenänderung  $\Phi$  erfährt, die durch

$$\Phi = (2\pi/\lambda) \cdot d \cdot (n_1 - n_2)$$

gegeben ist. Darin bezeichnet  $\lambda$  die Wellenlänge des auf das Korrekturglied 18 auftreffenden Lichts und d die Dicke des Korrekturelements 20 entlang der optischen Achse Z.

In dem zweiten Korrekturelement 22 hingegen wird die hierzu  
5 senkrechte Polarisationskomponente verzögert, da die Kri-  
stallorientierungen der Korrekturelemente 20, 22 und damit  
deren Doppelbrechungssachsen um  $90^\circ$  um die Z-Achse zueinan-  
der verdreht sind. Da die beiden Korrekturelemente 20, 22  
die gleiche Dicke haben, ist der Betrag der Phasenänderun-  
10 gen gleich. Auf diese Weise wird die durch das erste Kor-  
rekturelement 20 hervorgerufene Phasenänderung der einen  
Polarisationskomponente durch eine gleich große, durch das  
zweite Korrekturelement 22 hervorgerufene Phasenänderung  
der dazu senkrechten Polarisationskomponente kompensiert.  
15 Dort, wo die Dicken der beiden Korrekturelemente 20, 22 ex-  
akt gleich sind, wird somit die relative Phasenlage zwi-  
schen zueinander senkrechten Polarisationskomponenten und  
somit der Polarisationszustand des hindurchtretenden Lichts  
nicht verändert.

20 Um nun die in Figur 1 schematisch gezeigten Störungen der  
Polarisationsverteilung zu kompensieren, sind über den  
Querschnitt hinweg an geeignet gewählten Punkten die Dicken  
der beiden Korrekturelemente 20, 22 bewußt abweichend ge-  
wählt.

25 Figur 3 zeigt einen Querschnitt durch die beiden Korrektur-  
elemente 20, 22 vor dem Zusammenfügen. In stark übertriebe-

ner Darstellung sind dabei auf den einander zugewandten Oberflächen 24 und 26 der beiden Korrekturelemente 20, 22 zu Dickenschwankungen führende Strukturen zu erkennen, die komplementär zueinander ausgebildet sind. Dies bedeutet,  
5 daß zu jeder Erhöhung auf einer Oberfläche eine Ausnehmung auf der gegenüberliegenden Oberfläche korrespondiert, und daß die korrespondierenden Erhöhungen und Ausnehmungen so ausgebildet sind, daß sie beim Zusammenfügen der beiden Korrekturelemente 20, 22 paßgenau ineinander eingreifen.

10 Durch das mit einem Pfeil 28 angedeutete Zusammenführen der beiden Korrekturelemente 20, 22 entsteht dann das in Figur 4 gezeigte Korrekturglied 18, das aus einem Materialblock mit gleichmäßiger Gesamtdicke  $d_g$  besteht, der keinerlei Hohlräume enthält.

15 Wie in Figur 3 erkennbar ist, haben beide Korrekturelemente 20, 22 bei Außerbetrachtlassen der Dickenschwankungen die gleiche Dicke  $d$ , um die oben im Zusammenhang mit der Figur 2 erläuterte Grundcompensation der Phasenänderungen zu erzielen. An der Oberfläche 26 des zweiten Korrekturelements 22 sind durch Ionenstrahlätzzen oder ähnliche geeignete Bearbeitungsverfahren nachträglich mehrere Ausnehmungen 30, 32 und 34 eingearbeitet, um an dieser Stelle eine Störung der Polarisationsverteilung zu kompensieren. Die gegenüberliegende Oberfläche 24 des ersten Korrekturelements 20  
20 weist entsprechende Erhöhungen 30', 32' und 34' auf, deren Form exakt derjenigen der gegenüberliegenden Ausnehmungen entspricht. Die Erhöhungen 30', 32' und 34' werden erzeugt, indem zunächst das erste Korrekturelement 20 mit einem ge-

strichelt angedeuteten Dickenverhältnis 36 hergestellt wird, so daß durch nachträgliches Abtragen von Material um die Erhöhungen 30', 32' und 34' herum diese freigelegt werden können.

5 Es versteht sich, daß die hier vorgenommene Einteilung in Ausnehmungen 30, 32, 34 einerseits und Erhöhungen 30', 32', 34' andererseits lediglich dazu dient, die Darstellung zu vereinfachen. Ob man die Oberfläche 26 des zweiten Korrekturelements 22 durch die Ausnehmungen 30, 32, 34 oder aber 10 durch Erhöhungen definiert, die zwischen den Ausnehmungen 30, 32, 34 liegen, ist lediglich eine Frage der Definition. Ganz allgemein können die Oberflächen 24, 26 der Korrektur-elemente 20 bzw. 22 eine praktisch beliebige, jedoch zueinander komplementäre Welligkeit aufweisen.

15 Um Lage und Ausmaß der Dickenschwankungen festzulegen, kann beispielsweise wie folgt vorgegangen werden:

Zunächst wird in einer Bildebene des optischen Systems, in dem die Korrekturereinrichtung 16 eingebaut ist, die Polarisationsverteilung meßtechnisch aufgenommen. Hierzu werden 20 in einer Objektebene des optischen Systems nacheinander zwei orthogonale Polarisationen eingestellt und jeweils in der Bildebene der Polarisationszustand erfaßt. Aus der Differenz der Meßergebnisse errechnet sich der Korrekturbedarf in Abhängigkeit von der optischen Lage des Korrekturglieds 25 18. Befindet sich das Korrekturglied 18 in einer Pupillenebene des optischen Systems, so ist die Wirkung des Korrek-

turgliedes 18 feldunabhängig. Dadurch ist es möglich, den mittleren Polarisationsfehler im Feld als Korrekturgröße zu verwenden. Wenn mit  $\Phi(\theta, \varphi)$  die Phasendifferenz zwischen den beiden senkrechten Polarisationszuständen in Abhängigkeit von den Winkelkoordinaten  $\theta$  und  $\varphi$  von Strahlen in der Bild-ebene bezeichnet wird, so ergibt sich die erforderliche Dickenschwankung  $\Delta d$  eines Korreturelements an den Ortskoordinaten  $(x, y)$  aus

$$\Delta d(x, y) = \Phi(\theta, \varphi) \cdot (\lambda/2\pi) \cdot 1/(n_1 - n_2) .$$

Da eine Dickenschwankung  $\Delta d(x, y)$  an einem Ort  $(x, y)$  bei dem in den Figuren 2 bis 4 gezeigten Ausführungsbeispiel jeweils gleichmäßig auf die beiden Korreturelemente 20, 22 verteilt wird, um die Gesamtdicke  $d_g$  konstant zu halten, führt dies bei den beiden Korreturelementen 20, 22 an dem Ort  $(x, y)$  zu einer Erhöhung bzw. Ausnehmung um einen Betrag von  $d_z = \Delta d/2$ . Diese Größe  $d_z$ , die herstellungstechnisch die Höhe des erforderlichen Materialabtrags angibt, wird im folgenden als Profiltiefe bezeichnet. Die Tatsache, daß die Profiltiefe gegenüber der erforderlichen Dickenschwankung  $\Delta d$  um den Faktor 2 verringert ist, hat erhebliche herstellungstechnische Vorteile, da es mit den bisher bekannten Verfahren zum hochgenauen Materialabtrag bisweilen Schwierigkeiten bereitet, große Profiltiefen zu erzielen.

In Figur 3 ist die Profiltiefe  $d_z$  beispielhaft für den Ort mit der größten bzw. der geringsten Dicke der Korreturelemente 20, 22 eingezeichnet. Aus dieser Darstellung ergibt

sich auch, daß der Dickenverhältnis 36 auf dem ersten Korrektorelement 20 so gewählt werden sollte, daß er (mindestens) gleich der maximalen Profiltiefe und somit der Hälfte der maximalen Dickenschwankung  $\Delta d$  ist, die zur Störungskompensation erforderlich ist.

Die sich auf diese Weise ergebenden Profiltiefen  $d_z$  liegen bei einer Anwendung des Korrektorelements 16 in der Mikrolithographie mit Wellenlängen von 193 nm oder 157 nm in der Größenordnung von einigen hundert Nanometern, während die Dicken  $d$  der Scheiben in der Größenordnung einiger Millimeter liegen. Die in Figur 3 dargestellten Profiltiefen  $d_z$  sind somit stark übertrieben dargestellt.

Figur 5 zeigt ein anderes Ausführungsbeispiel einer Korrektoreinrichtung, die insgesamt mit 118 bezeichnet ist. Teile, die denen des in den Figuren 2 bis 4 gezeigten Ausführungsbeispiels entsprechen, sind dabei mit um 100 erhöhten Bezugsziffern versehen. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist das erste Korrektorelement in zwei Teilelemente 120a; 120b aufgeteilt, die zwischen sich das zweite Korrektorelement 122 einschließen und deren Gesamtdicke derjenigen des zweiten Korrektorelements 122 entspricht. Die Dickenschwankungen  $\Delta d$  sind hier auf zwei Grenzflächen aufgeteilt, die durch die im wesentlichen parallelen Oberflächen 126, 127 des zweiten Korrektorelements 122 festgelegt sind. Dadurch halbiert sich für jede dieser Oberflächen 126, 127 die Profiltiefe nochmals um einen Faktor 2 auf  $d_z/2 = \Delta d/4$ .

Figur 6 zeigt in einem Querschnitt ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine Korrektureinrichtung, die insgesamt mit 216 bezeichnet ist. Die Korrektureinrichtung 216 umfaßt zum einen das Korrekturglied 18, wie es in den Figuren 2  
5 bis 4 gezeigt ist. Ferner enthält die Korrektureinrichtung 216 zwei weitere Korrekturelemente 220 und 222, die gemeinsam ein weiteres Korrekturglied bilden. Wie links neben dem Querschnitt dargestellt ist, gehen die Orientierungen der Kristallachsen der beiden Korrekturelemente 220 und 222  
10 durch eine Drehung um  $45^\circ$  aus den Kristallachsen der Korrekturelemente 20 bzw. 22 hervor. Dadurch stehen auch bei den beiden äußeren Korrekturelementen 220, 222 die schnellen Kristallachsen und auch die langsamsten Kristallachsen jeweils senkrecht aufeinander. Auf diese Weise kompensieren sich, wenn Dickenschwankungen zunächst unberücksichtigt bleiben, die beiden äußeren Korrekturelemente 220, 222 vollständig in ihrer Wirkung auf die Polarisation hindurchtretenden Lichts.

Wie in Figur 6 übertrieben dargestellt ist, weisen auch die äußeren Korrekturelemente 40 und 42 Dickenschwankungen auf, die in der oben bereits beschriebenen Weise zueinander komplementär sind. Auf Grund ihrer Anordnung an gegenüberliegenden Seiten des Korrekturgliedes 18 können die dadurch entstehenden Ausnehmungen und Erhöhungen jedoch nicht mit  
20 einander in Eingriff gebracht werden. Die Gesamtdicke  $d_g$  der Korrektureinrichtung 216 ist jedoch an jeder Koordinate  
25  $(x, y)$  die identisch.

Da die Doppelbrechungssachsen des durch die beiden äußeren Korrekturelemente 220, 222 gebildeten Korrekturglieds um 45° gegenüber den Doppelbrechungssachsen des Korrekturglieds 18 verdreht sind, lassen sich durch die Korrektur einrichtung 216 nicht nur Phasenverschiebungen, sondern auch Drehungen der Polarisationsrichtung kompensieren. Um in diesem allgemeinen Fall die Anordnung und Größe der Dickenschwankungen auf den einzelnen Korrekturelementen 20, 22, 220 und 222 zu bestimmen, wird vorzugsweise für jeden Feldpunkt und für jede Winkelkoordinate die Jonesmatrix als Linearkombination von Elementarmatrizen dargestellt, die Phasenverschiebungen und Drehungen der Polarisation beschreiben.

Durch Gleichsetzen der so dargestellten Jonesmatrix für jeden Feldpunkt mit einer Jonesmatrix für die in Figur 6 gezeigte Anordnung, die lediglich phasenverschiebende Elemente enthält, kann durch Koeffizientenvergleich auf die Größe der Dickenschwankungen an den Punkten (x,y) auf den Oberflächen der Korrekturelemente geschlossen werden.

Mit 40 ist in Figur 6 beispielhaft und ebenfalls nicht maßstäblich ein zusätzlicher Materialabtrag angedeutet, der lediglich an einer nach außen weisenden Oberfläche 42 des Korrekturelements 220 vorhanden ist und keine Entsprechung in Form einer korrespondierenden Erhöhung an dem zugeordneten Korrekturelement 222 hat. Dieser Materialabtrag dient dazu, bei der Polarisationskompensation auftretende kleine Wellenfrontfehler zu beseitigen. Dabei wird ausgenutzt, daß sich ein Materialabtrag bei  $MgF_2$  etwa hundertmal stärker auf die Wellenfront auswirkt als auf die Polarisation.

Figur 7 zeigt in einem vereinfachten Meridionalschnitt ein katadioptisches, insgesamt mit 56 bezeichnetes Projektionsobjektiv einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage. Das Projektionsobjektiv 56 dient dazu, in einem Retikel 58 enthaltene Strukturen verkleinert auf einer lichtempfindlichen Oberfläche abzubilden, die auf einem Substrat 60 aufgebracht ist. Durch das Retikel 58 hindurchtretendes Projektionslicht tritt in einen Strahlteilerwürfel 62 ein, wird dort an einer polarisationsselektiven Strahlteilerschicht 64 reflektiert und über ein Viertelwellenlängenplättchen 66 und mehrere Linsen auf einen sphärischen Abbildungsspiegel 68 geworfen. Nach Reflektion an dem Abbildungsspiegel 68 wird die Polarisation erneut in dem Viertelwellenlängenplättchen 66 gedreht, so daß das Projektionslicht nunmehr die Strahlteilerschicht 64 durchdringen und in einen rein dioptischen Teil 70 des Projektionsobjektivs 60 gelangen kann.

Der sphärische Abbildungsspiegel 68 ist in der Nähe einer Pupillenebene 72 des Projektionsobjektivs 60 angeordnet. Unmittelbar vor dem Abbildungsspiegel 68, d.h. ebenfalls in der Nähe der Pupillenebene 72, ist eine Korrektureinrichtung 316 angeordnet, die zwei sphärisch gekrümmte Korrekturelemente 320, 322 umfaßt. Durch die Krümmung ist sicher gestellt, daß die Korrektureinrichtung nicht zu weit von der Pupillenebene 72 entfernt angeordnet ist. Außerdem wirkt sich die Korrektureinrichtung 316 auf diese Weise weniger auf den Wellenfrontverlauf von unter großem Aperturwinkel auftreffenden Strahlen aus. Da aufgrund der Reflexi-

on an dem Abbildungsspiegel 68 jeder Projektionslichtstrahl die Korrektureinrichtung 316 zweimal durchtritt, können die Dickenschwankungen  $\Delta d$  um einen Faktor 2 im Vergleich zu einer Anordnung reduziert werden, bei der nur ein einmaliger  
5 Durchtritt durch das Korrekturelement stattfindet.

### Patentansprüche

---

1. Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels (10) in einem optischen System (56), mit mindestens einem Korrekturglied (18; 118), das ein doppelbrechendes Korrekturelement (22; 122; 222; 322) mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen (26; 126, 127) umfaßt, zwischen denen die Dicke (d) des Korrekturelements (22, 122, 222) im wesentlichen konstant ist,  
dadurch gekennzeichnet,
  - 10 daß das wenigstens eine Korrekturglied (18, 118) wenigstens ein dem einen Korrekturelement (22; 122; 222; 322) zugeordnetes weiteres doppelbrechendes Korrekturelement (20; 120a, 120b; 220; 320) mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen (24) aufweist, daß wenigstens eine der Oberflächen (24, 26; 126, 127) wenigstens eines der Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so nachbearbeitet ist, daß sich lokale Dickenschwankungen  $\Delta d$  ergeben, durch die die Störungen der Polarisationsverteilung zumindest annähernd kompensiert werden, und daß die Anordnung, 20 Dicke (d) und Doppelbrechungseigenschaften der Korrektur-elemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so gewählt sind, daß sich deren doppelbrechenden Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn die lokalen Dickenschwankungen  $\Delta d$  außer Betracht bleiben.

2. Korrektureinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) aus demselben Material bestehen.
- 5 3. Korrektureinrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen (24, 26; 126, 127) der Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) so komplementär zueinander nachbearbeitet sind, daß die Gesamtdicke ( $d_g$ ) aller Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) eines Korrekturglieds (18; 118) über deren Querschnitt hinweg konstant ist.
- 10 4. Korrektureinrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Korrekturglied (18; 118) zwei Korrekturelemente umfaßt und daß die zur Störungskompensation an einem bestimmten Punkt erforderliche lokale Dicken- schwankung  $\Delta d$  so verteilt ist, daß an diesem Punkt die Dicke (d) bei einem Korrekturelement (22) um  $\Delta d/2$  verringert und bei dem anderen Korrekturelement (20) um  $\Delta d/2$  vergrößert ist.
- 15 20 5. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen der Korrekturelemente (320, 322) gekrümmmt sind.
- 25 6. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Korrekturglied (18, 118) zwei Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b,

122; 220; 222; 320, 322) umfaßt, deren Doppelbrechungssachsen zueinander um  $90^\circ$  verdreht sind.

7. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens ein Korrekturelement (220) eine Oberfläche aufweist, die zusätzlich derart nachbearbeitet (40) ist, daß Wellenfrontfehler aufgrund der Dickenschwankungen verringert werden.
8. Korrektureinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Korrekturglieder (18, 220 und 222) vorgesehen sind, wobei die Doppelbrechungssachsen der Korrekturelemente (20, 22) des einen Korrekturglieds (18) um  $45^\circ$  zu den Doppelbrechungssachsen der Korrekturelemente (220, 222) des anderen Korrekturglieds verdreht sind.
- 15 9. Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie mit einer Korrektureinrichtung (316) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektureinrichtung (316) zumindest annähernd in einer Pupillenebene (72) des Projektionsobjektivs (56) angeordnet ist.
11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektureinrichtung (316) in unmittelbarer Nähe eines Abbildungsspiegels (68) angeordnet ist,

der in einem katadioptischen Teil des Projektionsobjektivs (56) enthalten ist.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Korrektureinrichtung 5 nach einem der Ansprüche 1 bis 8 zumindest annähernd in einer Feldebene des Projektionsobjektivs (56) angeordnet ist.

## Zusammenfassung

=====

Eine Korrektureinrichtung zur Kompensation von Störungen der Polarisationsverteilung über den Querschnitt eines Lichtbündels (10) weist ein Korrekturglied (18; 118) auf, das zwei doppelbrechende Korrekturelemente (20, 22; 120a, 5 120b, 122; 220; 222; 320, 322) mit zwei im wesentlichen parallelen Oberflächen (24, 26; 126, 127) umfaßt. Zwischen den Oberflächen (26; 126, 127) ist die Dicke (d) des Kor- rekturelements (22, 122, 222) im wesentlichen konstant. We- nigstens eine der Oberflächen (24, 26; 126, 127) wenigstens 10 eines der Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) ist so nachbearbeitet, daß sich lokale Dik- kenschwankungen  $\Delta d$  ergeben, durch die die Störungen der Po- 15 larisationsverteilung zumindest annähernd kompensiert wer- den. Die Anordnung, Dicke (d) und Doppelbrechungseigen- schaften der Korrekturelemente (20, 22; 120a, 120b, 122; 220; 222; 320, 322) sind so gewählt, daß sich deren doppel- brechenden Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn die lokalen 20 Dickenschwankungen  $\Delta d$  außer Betracht bleiben. Die Korrekt- einrichtung beeinflußt die Polarisation nur dort, wo Stö- rungen kompensiert werden sollen.

(Figur 3)

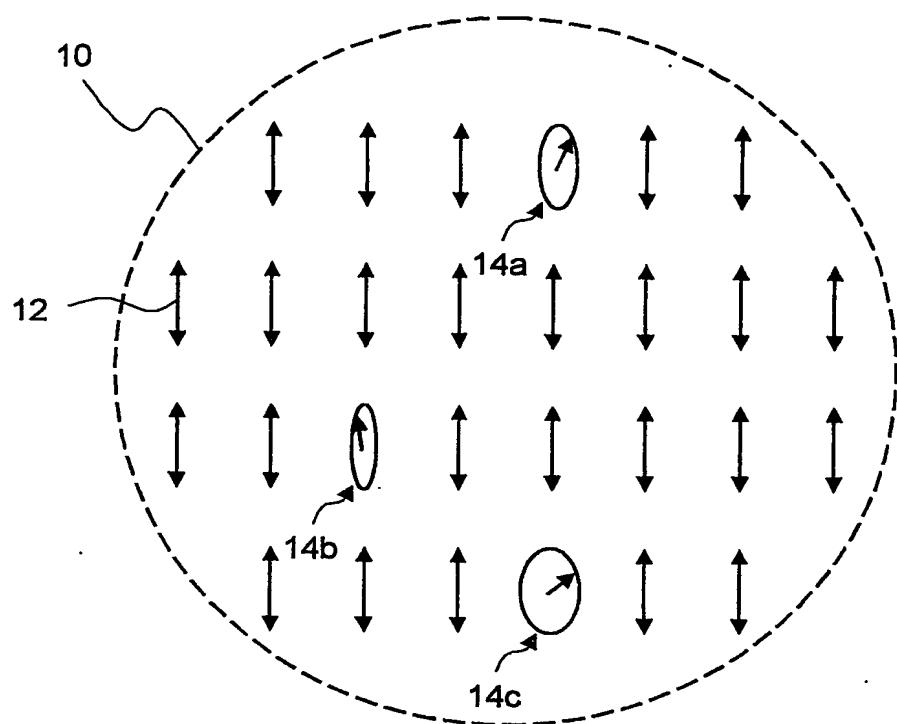


Fig. 1

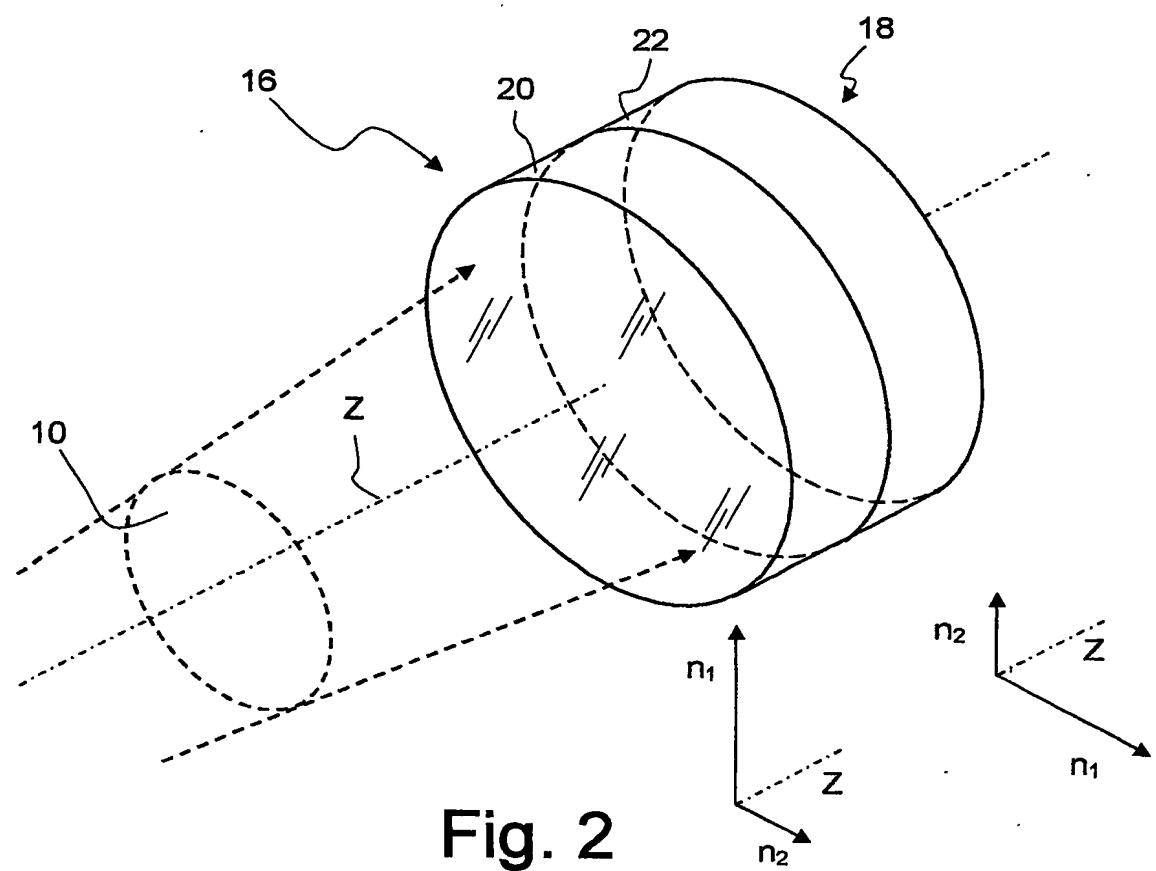


Fig. 2

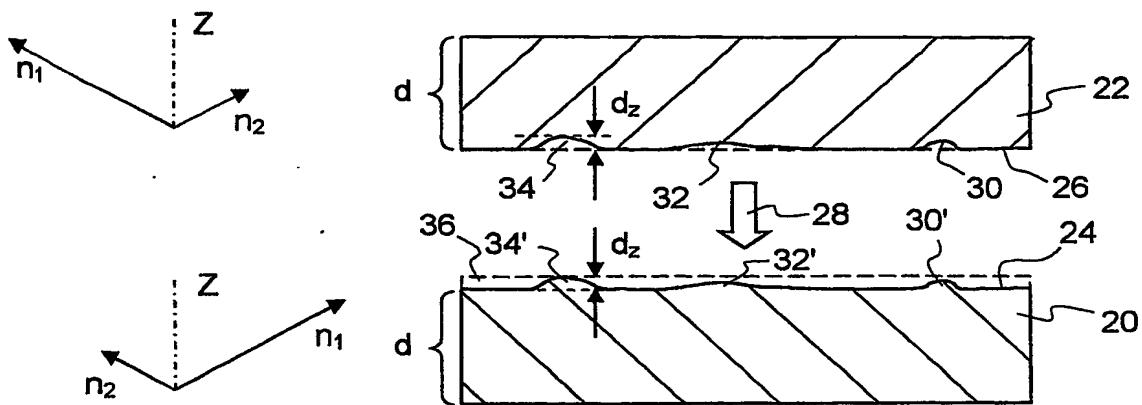


Fig. 3

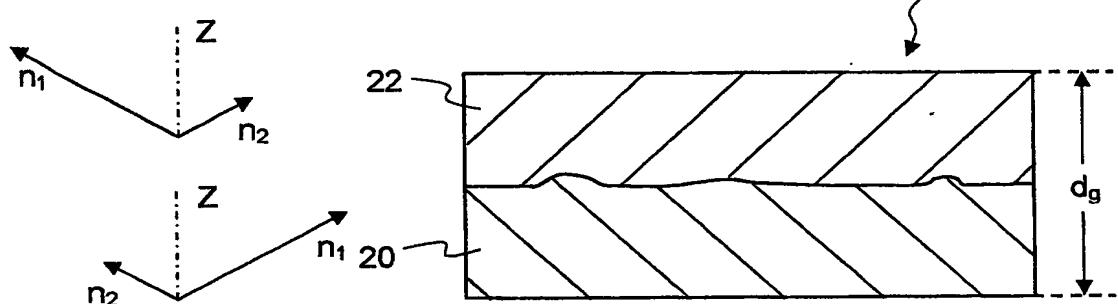


Fig. 4

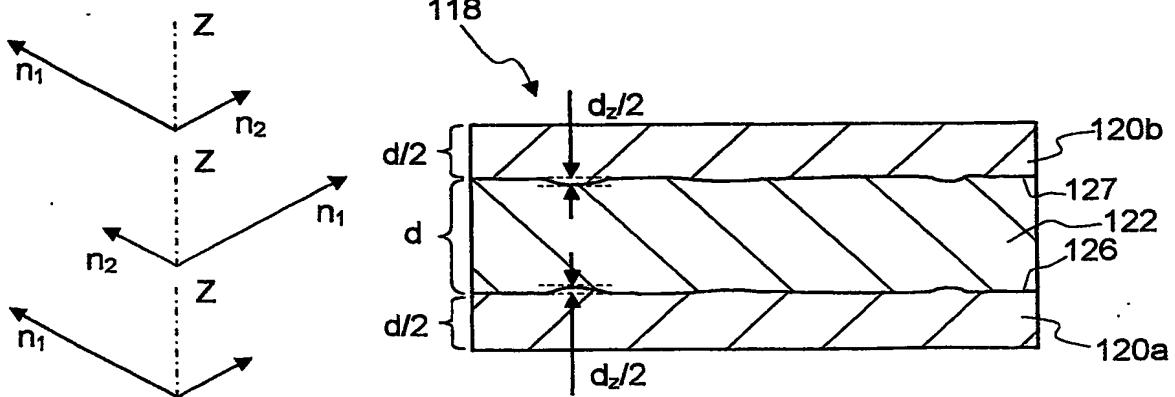


Fig. 5

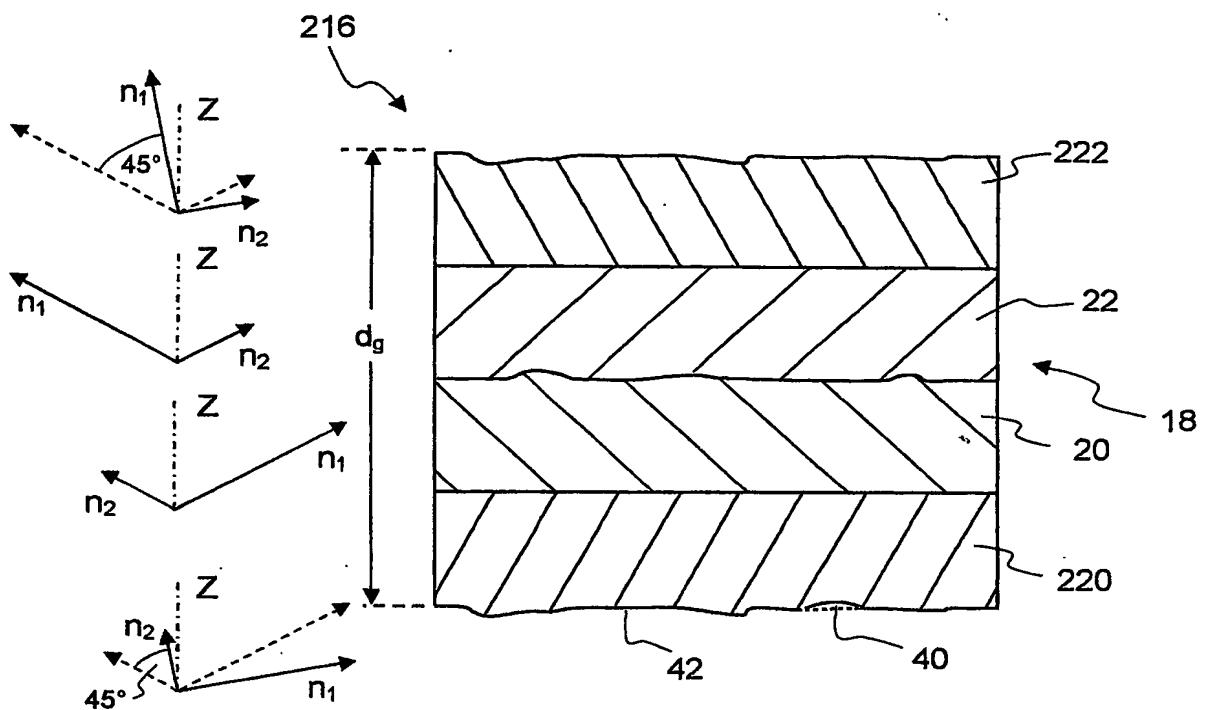


Fig. 6

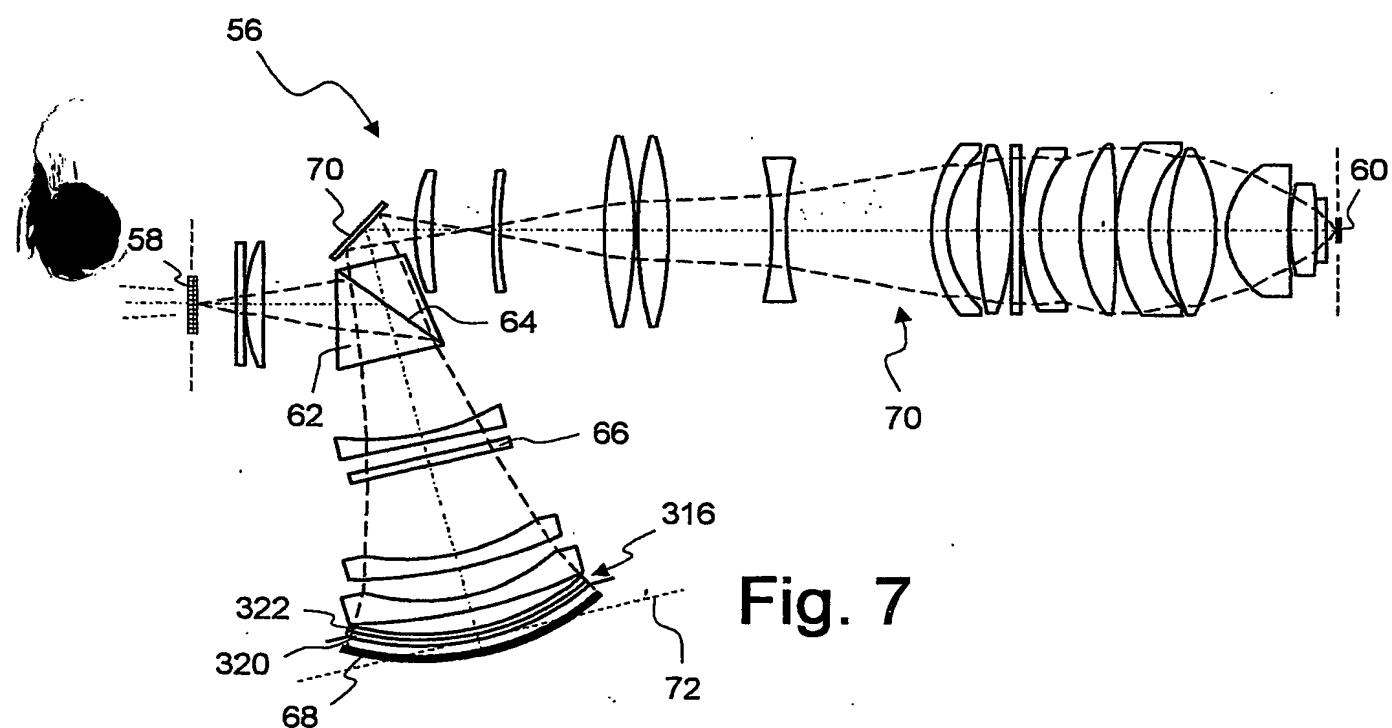


Fig. 7